

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686061

研究課題名(和文) 心血管系動態の高精度計測のための超高速超音波イメージングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of ultrahigh frame rate ultrasound imaging system for measurement of cardiovascular dynamics

研究代表者

長谷川 英之 (Hasegawa, Hideyuki)

東北大学・医工学研究科・准教授

研究者番号：00344698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：循環器系は動的な器官であるため動態計測が必要不可欠である。超音波診断はCT, MRIに比べ時間分解能に優れるため動態計測に適しており、本研究者はこれまでに、超音波診断の長所である時間分解能を、血管系の計測において従来の数十Hzから1 kHz以上に飛躍的に向上させる方法を開発した。本研究では、心臓についても高速超音波イメージングを可能とするための超音波照射方法および受信ビームフォーミング法・超音波断層像構築手法について研究開発するとともに、開発した高速超音波イメージング法を実現するための多チャンネル超音波送受信システムの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Measurement of cardiovascular dynamics is invaluable for assessment of cardiovascular function. Diagnostic ultrasound is superior in temporal resolution compared to computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) and suitable for measurement of cardiovascular dynamics. We have already increased imaging frame rate of superficial arteries from several tens Hertz of conventional imaging method to over 1 kHz. In the present study, methods for unfocused transmit beams, receive beamforming, and ultrasound image reconstruction have been developed to realize high frame rate echocardiography. Also, a multi-channel ultrasound transmission and reception system has been developed for implementing the proposed high frame rate imaging method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：超音波 高時間分解能 並列ビーム形成 心血管系 動態

1. 研究開始当初の背景

心臓超音波断層法は、リアルタイムかつ非侵襲的に心臓の断層像を観察することができる、最も有用な心臓診断法の一つである。超音波診断装置は磁気共鳴映像法(MRI)やコンピュータ断層撮影法(CT)などの診断方法に比べ時間分解能が優れているため、BモードあるいはMモードに基づいて心駆出率(EF)のような心機能検査を簡便に行うことができる。また、局所の心筋機能を定量的に評価するために、心筋ストレイン(ひずみ)あるいはストレインレート(ひずみ速度)の測定方法が開発されている。これらの方法を用いて心臓の運動を測定することにより、心臓壁の局所の変形量を推定することができる。測定したストレインおよびストレインレートそれ自身が局所の心筋機能の評価に有用ではあるが、心筋の収縮/弛緩時の壁の変位および心臓弁閉鎖による壁振動の伝播を測定することが心筋機能および粘弾性の評価に有用であることが示されている。しかし、これらの測定には従来の超音波診断装置よりもはるかに高いフレームレートが必要である。例えば、電気的興奮はプルキンエ線維や心筋では典型的には0.3-4 m/sの速度で伝播し、それに対応する心筋収縮の伝播速度は0.5-7 m/sである。この電気的興奮の伝播とその結果として起こる心臓壁の微小振動の伝播を測定するためには、従来の超音波診断装置で実現できる数十 Hz よりもはるかに高いフレームレート(典型的には200 Hz程度以上)が必要である。

フレームレートを向上させるため、超音波画像の描画範囲と走査線の総数を減らすことでフレームレートを200 Hz以上に上昇させる手法が用いられているが、視野範囲が極端に制限されるという問題がある。また、超音波画像に心電同期技術を導入し、1心拍ごとに測定した狭いセクタ領域を結合して観察範囲全体のセクタ型断層像を構築する手法も提案されている。この方法では、約500 Hzの高フレームレートを実現するために、1回の撮像で得たセクタ領域の横方向のサイズ(走査線の数に相当)を制限し、複数心拍間に測定したその心拍数分の小セクタ領域を、心電同期により結合させて所望の描画範囲に対応するセクタ画像を作成している。この方法では500 Hzのフレームレートが実現可能であり、通常フレームレートである数十 Hzよりもはるかに高いが、複数の心周期に渡って測定することが必要である。

心電同期なしで約500 Hzの高フレームレートを実現するために、我々は低走査線密度のセクタ走査により、走査線数を約10に低減させた。この方法では、少数の走査線で広い横方向の描画範囲を得るために、走査線の角度間隔を増加させた。そのため、心電同期なしで広い範囲の超音波断層像を高フレームレートで得られるものの、横方法の画像解像度は著明に劣化している。

これらのことから、心電同期を必要とせずかつ、空間分解能の極端な劣化を避けながら高い時間分解能を実現する超音波イメージング法が必要である。

2. 研究の目的

本申請者はこれまでに、超音波診断の長所である時間分解能を、血管系の計測において従来の数十 Hz から1 kHz以上に飛躍的に向上させる方法を開発した。しかし、この血管用超高速イメージング法は視野が狭く、心臓の計測に適用することができない。また、上記研究において使用した、血管系の超高速イメージングのために必要となる超音波アレイプローブの各素子ごとの受信信号を計測するためのシステムは、個別に開発した多くのユニットを組み合わせることで構築したため大掛かりである。しかも、オフラインシステムであるため、計測の際に計測断面の確認ができないという問題があった。また、開発した超高速イメージング・動態計測法の有用性を示すためには、臨床での測定が必須であるが、現状のシステムでは臨床計測は困難である。本研究ではこのような問題を解決するため、心臓の高時間分解能計測も可能とする手法を開発するとともに、リアルタイムで断層像を提示しながら高フレームレートで超音波信号の計測が可能な超高速イメージングシステムの開発を行った。

3. 研究の方法

(1) 超音波送信方法

5 kHzの典型的パルス送信繰り返し周波数の下で200 Hz以上のフレームレートを達成するためには、送信数は25以下でなければならない。したがって、本研究では、送信波は角度間隔 $\theta = 6^\circ$ で15方向 $\{m\theta\}$ ($m = -7, -6, \dots, 0, 1, \dots, 7$) に送信した。

非集束送信波の一般的なものとして平面波が挙げられる。円形平面トランスデューサーでは、フレネルゾーン(近距離音場の幅)は開口直径 D および超音波の波長 λ により $D^2/(4\lambda)$ と定義される。本研究で用いたセクタプローブの開口直径 D および超音波の波長 λ はそれぞれ約20 mmおよび約0.4 mm(中心周波数3.75 MHz)である。本研究で用いたフェーズドアレイプローブは円形ではないが、近距離音場の幅はこの等式により近似的に算出することができる。使用したプローブのフレネルゾーンの幅は250 mmであるため、本研究における観察深度約130 mmは近距離音場である。近距離音場では、平面波の幅は一定である。一方、セクタ状の超音波イメージングでは、一度の送信によって画像化される小セクタの横方向の幅がプローブからの距離に伴って増加するため、ビーム幅が変化しない平面波では描画範囲が制限されると考えられる。

この問題を解決するために、本研究では平面波に加えて球面拡散波についても検討を

行った．合成開口イメージングでは，球形波を放射するために各素子が個別に用いられる．このような拡散波はセクタ状の超音波イメージングに有用であると思われる．しかし，単一素子を使用しているために，拡散波の音圧は著しく低下する．この問題を解決するために，本研究では全てのトランスデューサー素子を用いて球面拡散波を合成する．開口中心の素子を，開口端の素子よりも早く励振するように各素子への印加信号の遅延時間を制御することにより多素子を用いて球面拡散波を送信することが可能である．また，平面波を偏向する際と同様の遅延時間も加えることで球面拡散波を偏向することも可能である．

(2) 受信並列ビームフォーミング

本研究では，従来のセクタ走査と同様の走査線数および密度を実現するために，角度間隔 0.375° ，15 方向への超音波送信（平面あるいは拡散波）それぞれにおいて，角度間隔 0.375° で 16 本の受信ビームを形成した．

受信ビームフォーミングにおいて，画像化対象領域内の各点に関する超音波の往復伝播時間は以下のように計算した．往路については，平面波は理想的な平面波が伝播することを仮定し，球面拡散波についてはアレイ型超音波プローブ内部に想定した仮想点音源からの球面波を仮定し，その波面が画像化対象領域内の各点まで伝播するまでの時間を算出した．復路については平面波と球面拡散波いずれも画像化対象領域内の各点からの球面波がアレイまで伝播する際の伝播時間として算出した．

4. 研究成果

(1) 高速超音波イメージングシステム

本研究では，開発した高速超音波イメージング法を実現するための超音波送受信システムの開発を行った．開発したシステムは 96 チャンネルで，市販のフェーズドアレイプローブの全 96 素子を同時に励振し，対象領域からの超音波散乱波を全 96 素子で独立に受信することが可能である．受信した素子ごとの信号は，FPGA と DSP を用いて処理することにより 10 Hz 程度のフレームレートでリアルタイムに断面像を表示することができる．これにより，計測中に断面の位置を確認することができる．高速超音波イメージング法では，実際のフレームレートは最高 1 kHz 以上に達するため，10 Hz 程度で断面像をリアルタイム表示しながら，1 kHz 以上のフレームレートで受信される超音波信号を収集して保存することが可能な機構を有している．

(2) 高速超音波イメージング法の評価

本評価実験では，水中に設置した細径ナイロンワイヤ（直径約 0.1 mm）を空間分解能の評価のために使用した．図 2 に従来のセクタ走査および並列ビームフォーミングとコ

ンパウンド（平面波およびアレイと仮想点音源の距離 100 mm, 50 mm の拡散波を使用）により得られたワイヤの B モード断面像を示す．図 1(1), (2) では，矩形アポダイゼーションおよびハニングアポダイゼーションをそれぞれ使用した．図 2 から分かるように，矩形アポダイゼーションを利用した場合にはサイドロープレベルが上昇した．したがって，ハニングアポダイゼーションを以後の実験に使用した．

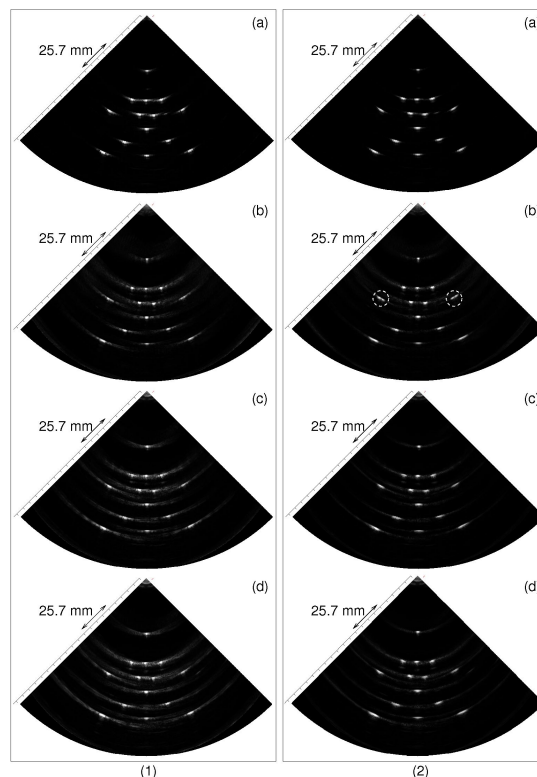


図 1: 細径ワイヤの B モード断面像 .(a) 従来のセクタ走査 .(b) 平面波 .(c) 拡散波(仮想点音源位置-100 mm) .(d) 拡散波(仮想点音源位置-50 mm) .(1) 矩形アポダイゼーション .(2) ハニングアポダイゼーション .

平面波を用いた並列ビームフォーミングにより得られた B モード断面像では，平面波の幅が拡散波に比べると狭く，また偏向角が大きくなるとビーム幅が狭まるため，偏向角が大きい領域(図 1(2b)で白点線に囲まれた部分)において点拡がり関数に歪みが発生したがって，平面波を用いる場合，偏向角は制限する必要がある．一方，このような点拡がり関数の歪みは拡散波を用いた並列ビームフォーミングにより得られた B モード断面像では認められなかった．

図 2(a), (b) にラテラル(横)方向位置 0° ，ビーム方向位置 41 mm における画像のビーム方向および横方向のプロファイル(点拡がり関数に対応)を示す．また，図 2 に示す点拡がり関数の半値幅を表 1 に示す．図 2 に示すように，平面波送信により最も高い横方向の空間分解能が得られた．拡散波により得られた点拡がり関数の半値幅は従来のビームフ

フォーミングおよび平面波を用いた並列ビームフォーミングにより得られたものよりやや広がったが、従来のビームフォーミングにより得られたものと非常に近い点拡がり関数が拡散ビームおよびコンパウンドにより実現できた。

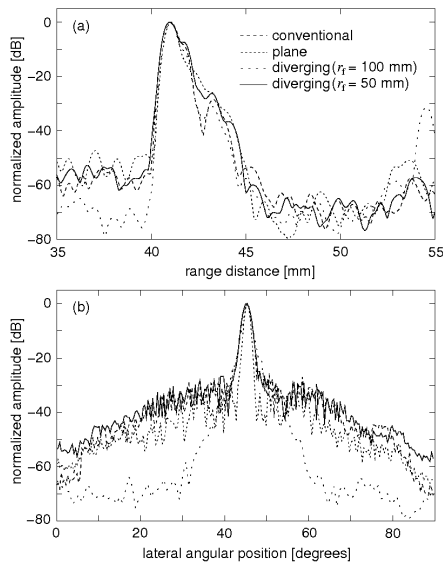


図2: ビームフォーミング後RF信号の包絡線のビーム方向および横方向のプロファイル。(a) 横方向角度位置 0°におけるビーム方向プロファイル。(b) 距離方向位置 41 mmにおける横方向プロファイル。

	conventional beamforming	plane wave	diverging wave ($r_f = 100$ mm)	diverging wave ($r_f = 50$ mm)
axial [mm]	0.73	0.71	0.88	0.84
lateral [mm]	0.68	0.52	0.81	0.86

表1: 図2における点拡がり関数の半値幅。

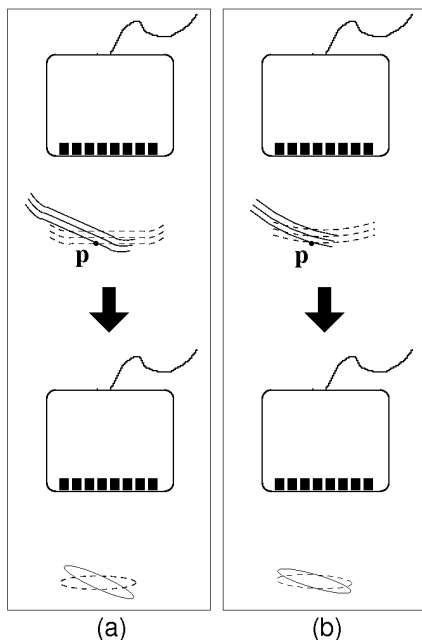


図3: 平面波(a)および拡散波(b)による波面および点拡がり関数の模式図。

図3(a), (b)はそれぞれ平面波および拡散波により得られた点拡がり関数を模式的に示す。図3の点拡がり関数が重なっている部分はコンパウンドの結果として得られる合成された点拡がり関数において強調される。図3にみられるように、最大偏向角度が同じ場合でも、平面波の場合の点拡がり関数の重複部は拡散波の場合より小さい。したがって、平面波送信によって最も高い横方向の分解能が得られると考えられる。しかし、平面波および拡散波のいずれでも並列ビームフォーミングを用いた横方向のサイドビームレベルは増加する。このサイドローレベルの増加は画像のコントラストを低下させるが、本手法によって従来のセクタ走査に匹敵する横方向の空間分解能が達成できた。

(3) 心臓の *in vivo* 高速超音波イメージング

図4(a)-(d)に、従来のセクタ走査、平面波および拡散波(仮想点音源位置-50 mm および -100 mm)を用いた並列ビームフォーミングを用いて得られた23歳健康男性のBモード心臓断層像を示す。拡散波を使用した場合のコンパウンド回数の最大値は±2に制限した心臓のBモード断層像は平面波送信でも得ることができたが、図1に示すように平面波を用いた並列ビームフォーミングによる点拡がり関数には歪みが生じる。したがって、平面波送信の場合、偏向角度が小さい領域で使用することが適切である。図4(c), (d)に示すように、拡散波を用いることによって心臓のBモード断層像は横方向90°の範囲に関して316 Hzという高いフレームレートで描出することができ、仮想点音源位置-50 mm および -100 mmの拡散波いずれも同様の結果であった。画像のコントラストは高いサイドローレベルの上昇のために若干劣化したが、従来のセクタ走査に匹敵する画質のBモード断層像が、従来のセクタ走査(39 Hz)よりもはるかに高いフレームレート(316 Hz)で得られ、また心電同期を用いずに横方向90°の範囲を描出することができた。

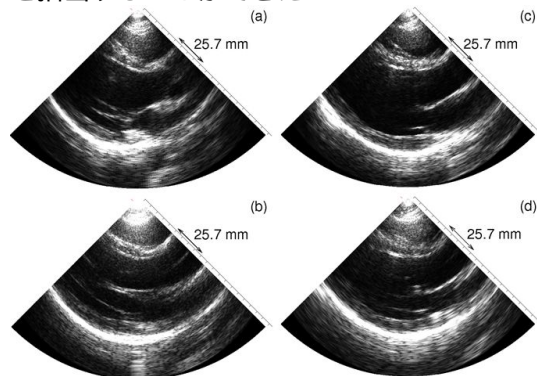


図4: 23歳健康男性の心臓Bモード断層像。(a) 従来のセクタ走査。(b) 平面波。(c) 仮想点音源位置-100 mmの拡散波。(d) および-50 mmの拡散波を用いた並列ビームフォーミング。コンパウンド回数の最大値は拡散波では2に限定した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

- 1) Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Improvement of Automated Identification of the Heart Wall in Echocardiography by Suppressing Clutter Component," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 52, pp. 07HF017-1-07HF017-7, Japanese Journal of Applied Physics, 2013. DOI: 10.7567/JJAP.52.07HF17
- 2) Hideyuki Hasegawa, Kazue Hongo, and Hiroshi Kanai, "Measurement of Regional Pulse Wave Velocity Using Very High Frame Rate Ultrasound," Journal of Medical Ultrasonics (査読有), vol. 40, pp. 91-98, 2013. DOI: 10.1007/s10396-012-0400-9
- 3) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "High Frame Rate Echocardiography With Reduced Sidelobe Level," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (査読有), vol. 59, pp. 2569-2575, 2012. DOI: 10.1109/TUFFC.2012.2490
- 4) Yasunori Honjo, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Optimization of Correlation Kernel Size for Accurate Estimation of Myocardial Contraction and Relaxation," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 51, pp. 07GF06-1-07GF06-12, 2012. DOI: 10.1143/JJAP.51.07GF06
- 5) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "High-Frame-Rate Echocardiography Using Diverging Transmit Beams and Parallel Receive Beamforming," Journal of Medical Ultrasonics (査読有), vol. 38, pp. 129-140, 2011. DOI: 10.1007/s10396-011-0304-0
- 6) Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Automated Identification of the Heart Wall Throughout the Entire Cardiac Cycle Using Optimal Cardiac Phase for Extracted Features," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), vol. 50, pp. 07HF16-1-07HF16-9, 2011. DOI: 10.1143/JJAP.50.07HF16
- 7) 本庄泰徳, 長谷川英之, 金井 浩, "二次元収縮弛緩特性計測を目指した心筋運動の高フレームレート計測," 電子情報通信学会論文誌 A (査読有), vol. J94-A, pp. 826-835, 2011.

[学会発表](計24件)

- 1) 藤田雄太, 田頭秀章, 長谷川英之, 福

- 永浩司, 金井 浩, "in vitro 実験における電氣的興奮に伴う心筋応答の遅延分布の可視化," The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics (November 20-22, 2013, Kyoto).
- 2) 浅利 大, 長谷川英之, 金井 浩, "心筋の変形を考慮した RF 信号間の相関算出による心臓壁の変位推定の高精度化," The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics (November 20-22, 2013, Kyoto).
- 3) 中原紘平, 長谷川英之, 金井 浩, "心臓壁領域同定のための超音波 RF 信号の特徴抽出の最適化," The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics (November 20-22, 2013, Kyoto).
- 4) 長谷川英之, 金井 浩, "並列ビーム形成法と回折トモグラフィ法の空間分解能の比較," The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics (November 20-22, 2013, Kyoto).
- 5) 高橋広樹, 長谷川英之, 金井 浩, "高フレームレート超音波計測を用いた左室内腔の経胸壁血流スペックルイメージング," The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics (November 20-22, 2013, Kyoto).
- 6) Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Speckle-Enhanced Cardiac Blood Flow Imaging with High Frame Rate Ultrasound," 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium (July 21-25, Prague, Czech).
- 7) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "Displacement Estimation of Arterial Wall from Multiple Directions by Utilizing Diverging Transmit Beam for Synthetic Aperture Ultrasound Imaging," 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium (July 21-25, Prague, Czech).
- 8) Hideyuki Hasegawa, Sho Kageyama, and Hiroshi Kanai, "Improvement of Axial Resolution of Ultrasound Image Using Wiener Filter for Measurement of Intima-Media Thickness of Carotid Artery," 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium (July 21-25, Prague, Czech).
- 9) Hideyuki Hasegawa, Yuji Sato, and Hiroshi Kanai, "High Frame Rate Ultrasonic Imaging of the Heart by Placing Virtual Point Source in Front of Array," 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium (July 21-25, Prague, Czech).
- 10) 高橋広樹, 長谷川英之, 金井 浩, "超音波エコーの可視化による心臓内血流の高速イメージング," 日本超音波医学会第86回学術集会(5月24-26日, 大阪, 2013).
- 11) 長谷川英之, 金井 浩, "動脈壁の局所弾性特性の超音波測定," 日本超音波医学会第86回学術集会(5月24-26日, 大阪, 2013).
- 12) 長谷川英之, 佐藤雄治, 金井 浩, "開口の前方に設定した仮想点音源の走査による心臓断層法の高速度化," 日本超音波医学会第86回学術集会(5月24-26日, 大阪, 2013).

13) Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Fast Cardiac Blood Flow Imaging by Visualization of Ultrasonic Echoes from Blood Particles," 32nd International Acoustical Imaging Symposium (April 29-May 1, 2013, Singapore).

14) Hideyuki Hasegawa, Yuji Sato, and Hiroshi Kanai, "High Frame Rate Echocardiography Using Virtual Point Source Moving in Front of Array," 32nd International Acoustical Imaging Symposium (April 29-May 1, 2013, Singapore).

15) Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "High Frame Rate Blood Flow Imaging by Visualization of Ultrasonic Echoes from Blood Particles in Echocardiography," 2013 International Congress on Ultrasonics (May 2-5, Singapore).

16) Yuta Fujita, Hideaki Tagashira, Hideyuki Hasegawa, Kohji Fukunaga, and Hiroshi Kanai, "Measurement and Analysis of Propagation of Myocardial Contraction Caused by Electrical Stimulation Using Myocardium of Rat," 7th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics (March 7-8, 2013, Sendai).

17) 高橋広樹, 長谷川英之, 金井 浩, "Improvement of Automated Identification of the Heart wall by Reducing Stationary Clutter in Ultrasonic Echoes," The 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 13-15, 2012, Chiba).

18) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "Suppression of Sidelobe in High Frame Rate Echocardiography Using Diverging Beams," Medicinteknikdagarna (October 2-3, 2012, Lind, Sweden).

19) Hiroki Takahashi, Hideyuki Hasegawa, and Hiroshi Kanai, "Automated Identification of the Heart Wall on Echocardiogram Throughout a Cardiac Cycle," Medicinteknikdagarna (October 2-3, 2012, Lind, Sweden).

20) Hideyuki Hasegawa and Hiroshi Kanai, "Ultrasound Elasticity Imaging of the Arterial Wall," Euromech 534 Colloquium (May 29-31, 2012, Saint Etienne, France).

21) Hideyuki Hasegawa, Jun Yamaguchi, and Hiroshi Kanai, "Ultrasonic Actuation of Biological Tissues Using Dual Acoustic Radiation Force for Assessment of Elastic Properties," International Symposium on Nonlinear Acoustics (May 21-24, 2012, Tokyo).

22) Hideyuki Hasegawa, Hiroshi Kanai, "High Frame Rate Ultrasonography for

Detailed Analysis of cardiovascular Dynamics," 18th International Symposium of Tohoku University Global COE Program Global Nano-Biomedical Engineering Education and Research Network Centre (March 5-6, 2012, Sendai).

23) 本江和恵, 長谷川英之, 金井 浩, "Visualization of Forward and Reflected Components in Minute Vibration Velocity Waveform of Human Arterial Wall," The 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 8-10, 2011, Kyoto).

24) 本庄泰徳, 長谷川英之, 金井 浩, "High Frame Rate Measurement of Two-dimensional Heart Wall Motion for Assessment of Regional Myocardial Contraction and Relaxation," The 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics (November 8-10, 2011, Kyoto).

〔図書〕(計2件)

1) Hideyuki Hasegawa, Hiroshi Kanai, Imperial College Press, Nano-Biomedical Engineering 2012, pp. 191-200, 2012.

2) Hideyuki Hasegawa, Jun Yamaguchi, Hiroshi Kanai, American Institute of Physics, Nonlinear Acoustics, pp. 251-254, 2012.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/hkanai/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 英之 (HASEGAWA, HIDEYUKI)

東北大学・大学院医工学研究科・准教授

研究者番号：00344698